

文章编号: 1004-4051(2023)07-0055-07

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230088

## 已关闭矿井老采空区稳定性评价方案研究

崔年生<sup>1</sup>, 郭泽洋<sup>2,3</sup>

- 福建省新华都工程有限责任公司, 福建 厦门 361000;
- 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
- 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

**摘要:** 为分析某已关闭矿井的老采空区稳定性, 通过对矿山采空区现状的详细调查, 明确采空区状态特征, 采用定性分析和数值模拟方法进行评价。研究结果表明: -250 m 中段以上采空区形成已有 20 余年, 覆岩厚大、完整性好、强度高且地表无开裂下沉, 综合判断其处于稳定状态; -250 m 以下中段采空区形成后, 出现局部区域的应力集中, 最大拉应力约 1.5 MPa, 未超过岩层的抗拉强度; 最大竖直位移出现在顶板位置, 整体位移变形较小, 下沉和底鼓现象不明显; 地表覆土后, 采空区应力和位移几乎无变化, 综合分析来看, 井下老采空区可以保持稳定。研究成果可以为老采空区稳定性的分析提供技术路线。

**关键词:** 采空区稳定性; 数值模拟; 关闭矿井; 地表变形

**中图分类号:** TD73 **文献标识码:** A

## Study on stability evaluation scheme of old goaf in closed mine

CUI Niansheng<sup>1</sup>, GUO Zeyang<sup>2,3</sup>

- Fujian Xinhudu Engineering Co., Ltd., Xiamen 361000, China;
- Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China;
- State Key Laboratory of Safety Technology Metal Mine, Changsha 410012, China)

**Abstract:** In order to analyze the stability of the old goaf in a closed mine, through the detailed investigation of the current situation of the mine goaf, the characteristics of the goaf state are clarified, and the qualitative analysis and numerical simulation methods are used to evaluate. The results show that the goaf above the middle section of -250 m has been formed for more than 20 years. The overburden is thick, complete, strong and has no cracking and sinking on the surface. It is in a stable state. After the formation of the middle goaf below -250 m, the stress concentration in the local area occurs, and the maximum tensile stress is about 1.5 MPa, which does not exceed the tensile strength of the rock layer. The maximum vertical displacement occurs in the roof position, the overall displacement deformation is small, the sinking and floor heave phenomenon is not obvious. After the surface is covered with soil, the stress and displacement of the goaf are almost unchanged. By the comprehensive analysis, underground goaf can remain stable. The research results are expected to provide a technical route for the analysis of the stability of the old goaf.

**Keywords:** stability of goaf; numerical simulation; mine closure; surface deformation

收稿日期: 2022-12-30 责任编辑: 边晶莹

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(编号: 52109124)

第一作者简介: 崔年生(1969—), 男, 江西宁都人, 采矿高级工程师, 主要从事矿山与爆破工程方面的施工研究, E-mail: cuiniansheng0236@sina.com。

通讯作者简介: 郭泽洋(1994—), 男, 河南安阳人, 硕士, 工程师, 主要从事矿山岩石力学方面的研究, E-mail: 2692353750@qq.com。

引用格式: 崔年生, 郭泽洋. 已关闭矿井老采空区稳定性评价方案研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(7): 55-61.

CUI Niansheng, GUO Zeyang. Study on stability evaluation scheme of old goaf in closed mine[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(7): 55-61.

## 0 引言

采空区稳定性是矿山安全生产的重点关注对象<sup>[1-3]</sup>。空场法开采的矿山会形成大量采空区, 矿井关闭后, 岩体在应力、地下水等条件的长期作用下强度逐渐降低, 导致矿柱失稳变形, 引起大范围的岩体移动, 可能造成地表多次沉陷<sup>[4]</sup>。此类变形具有突发性和长期性等特征, 因此分析关闭矿井的老采空区稳定性, 对矿山资源的二次开发及保护人民生命财产安全具有重要意义<sup>[5]</sup>。许多学者对此进行了研究, 赵亮等<sup>[6]</sup>利用数值模拟分析了石膏矿井下大面积采空区的稳定性及其对地表的影响; 谢伟等<sup>[7]</sup>基于 Mathews 图解法对采空区的稳定性进行了理论计算, 结合数值模拟进行采空区稳定状态的分析; 王万红等<sup>[8]</sup>对采空区群进行精密探测后, 建立数值模拟模型进行采空区群的稳定性分析; 张瑞等<sup>[9]</sup>采用多种分析方法相结合, 对采空区稳定性进行了综合分析和安全分级。

以某矿山开采后遗留的老采空区为研究背景,

基于现场采空区赋存现状的详细调查, 采用定性和数值模拟相结合的方法分析老采空区稳定性, 进一步研究地表塌陷坑覆土后对井下采空区稳定性的影响, 以期对矿山剩余资源二次回收提供安全保障。

## 1 采空区现状

矿区初期采用浅孔留矿法, 后期采用分段矿房法, 经过几十年的开采, 井下采空区和巷道错综复杂, 采矿后留下的矿柱多由于乱采形成不同程度、性质不明的采空区。1<sup>#</sup>矿体、2<sup>#</sup>矿体开采造成了大面积地面塌陷, 还形成了陡峭的悬崖及坡体张性地裂缝等, 3<sup>#</sup>矿体、4<sup>#</sup>矿体上方地表也有一定程度的塌陷, 形成了 1<sup>#</sup>塌陷坑~4<sup>#</sup>塌陷坑。目前 1<sup>#</sup>塌陷坑已经进行了复垦, 经过长期观测, 塌陷坑暂处于稳定状态, 2<sup>#</sup>塌陷坑、3<sup>#</sup>塌陷坑、4<sup>#</sup>塌陷坑暂未治理, 工程平面图如图 1 所示。根据矿山提供的资料信息和现场调查结果, 矿山-250 m 以上各中段已无法进入, 采空区情况无法查明, 3<sup>#</sup>矿体和 4<sup>#</sup>矿体的-250~-350 m 中段部分采空区及塌陷情况部分可明确。

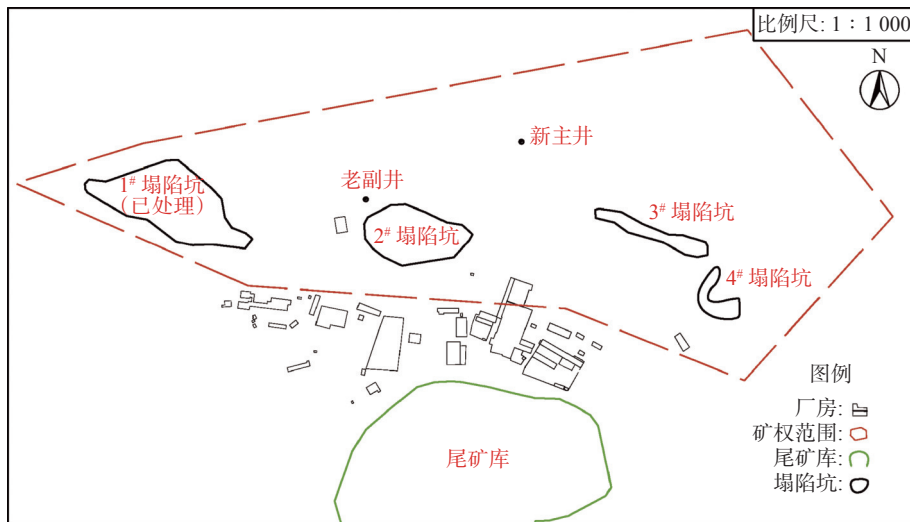


图 1 工程平面图

Fig. 1 Engineering plan

## 2 -250 m 以上采空区稳定性的定性分析

参照《采空区公路设计与施工技术细则》(JTG/T D31-03—2011)<sup>[10]</sup>中有关采空区公路场地稳定性评价标准, 结合矿山基本情况, 定性评价主要依据停采时间分析和条件判别法。

### 2.1 依据停采时间分析

经过 60 多年的井下开采, 矿山采空区崩落后在地表形成了 1<sup>#</sup>塌陷坑~4<sup>#</sup>塌陷坑等 4 处地面塌陷。自从 1958 年建矿以来, 至 2001 年底已开拓了+150 m、+100 m、+50 m、0 m、-50 m、-100 m、-150 m、-200 m、-250 m 等 9 个中段。1<sup>#</sup>矿体于 1998 年闭坑, -250 m

中段以上目前已全部采完, 依据停采时间分析其稳定性, 结果见表 1。按照矿区主要岩性灰岩、花岗闪长岩、矽卡岩、矿岩中单轴抗压强度最低的灰岩进行分析, 单轴抗压强度为 46.82 MPa。

表 1 按停采时间确定采空区稳定性评价表

Table 1 Stability evaluation table of goaf determined by stopping mining time

分析区域	1 <sup>#</sup> 矿体	2 <sup>#</sup> 矿体	3 <sup>#</sup> 矿体-250 m 以上	4 <sup>#</sup> 矿体-250 m 以上
停采年限/a	23	10	10	10
岩性	中硬	中硬	中硬	中硬
稳定性	稳定	稳定	稳定	稳定

2.2 条件判别法

根据采空区场地稳定性分析判据(表 2), 采用条件判别法对-250 m 中段以上采空区场地稳定性进行分析, 评价结果见表 3。由表 3 可知, 采空区受地形地貌、地质构造、地表松散层等因素的影响较大<sup>[11-12]</sup>, 影响程度为中度~重度。从开采角度分析, 根据矿山采用浅孔留矿法和分段空场采矿法的特点, 回采

率在 75% 左右, 早期已引起地表塌陷, 形成了 1#塌陷坑~4#塌陷坑, 但考虑到-250 m 中段以上在 2001 年左右已经开采结束, 塌陷坑在 2001 年之前已经形成, 距今已经有 20 余年的时间, 且覆岩厚大、完整性好、强度高, 截至目前采空区上方地表稳定, 未见有垮塌或裂缝继续产生, 综合分析目前 2#塌陷坑~4#塌陷坑处于基本稳定状态。

表 2 采空区稳定性初步评价主要判据

Table 2 Main criteria for preliminary evaluation of goaf stability

评价因子	影响程度		
	轻度	中度	重度
地形地貌	平地, 地面坡度 < 5°	丘陵, 地面坡度 5°~15°	山区, 地面坡度 > 15°
地质构造	无断层、褶皱、节理裂隙不发育	有断层、褶皱、节理裂隙发育	断层、褶皱发育、节理裂隙极发育
地表松散层	质地密实, 不含水或含水性极小, 厚度 > 30 m	质地一般, 含水性中等, 厚度 10~30 m	质地松软, 含水丰富, 厚度 < 10 m
覆岩特征	厚度大, 完整性好, 强度高	厚度中等, 完整性较, 强度较高	厚度小, 完整性差, 强度低
矿层倾角	水平或缓倾斜 (< 15°)	倾斜 (15°~75°)	水平或缓倾斜 (> 75°)
采区回采率	< 30%	30%~60%	> 60%
采空区埋深	深 (> 300 m)	较深 (100~300 m)	浅 (< 100 m)
开采厚度	小 (< 2 m)	中 (2~3 m)	大 (> 3 m)
开采层数	单层	多层	多层
顶板管理方法	充填式	柱式	垮落式
停采时间	> 3 a	2~3 a	< 2 a
采动效应	地表无明显变形迹象、 无积水	有地表裂缝及塌陷坑等、 季节性积水	地表裂缝、塌陷坑等强烈发育、 常年积水
场地稳定性	稳定或趋于稳定	基本稳定~欠稳定	目前不稳定, 将趋于稳定

表 3 采空区场地稳定性初步评价表

Table 3 Preliminary stability evaluation table of mined-out area

评价因子	描述	影响程度
地形地貌	山区, 地面坡度 > 15°	重度
地质构造	有断层、褶皱、节理裂隙发育	中度
地表松散层	质地一般, 含水性中等, 厚度 10~30 m	中度
覆岩特征	厚度大, 完整性好, 强度高	轻度
矿层倾角	倾斜 (55°)	中度
采区回采率	1#矿体	75% 左右
	2#矿体	75% 左右
	3#矿体	75% 左右
	4#矿体	75% 左右
采空区埋深	1#矿体	浅 (< 100 m)
	2#矿体	浅 (< 100 m)
	3#矿体	浅~较深 (100~300 m)
	4#矿体	浅~较深 (100~300 m)
开采厚度	18 m	重度
开采层数	多层	中度
顶板管理方法	垮落式	重度
停采时间	> 3 a	轻度
采动效应	有地表裂缝及塌陷坑等、季节性积水	中度
场地稳定性	稳定或趋于稳定	轻度

### 3 -250 m 以下采空区稳定的数值模拟分析

#### 3.1 模型建立

通过 Rhino 软件与 Griddle 软件相结合的方法,精细化地建立了三维计算模型,如图 2 所示。由图 2 可知,整体模型长 1 585 m,宽 820 m,高 530 m,1<sup>#</sup>塌陷区体积约 312 000 m<sup>3</sup>,2<sup>#</sup>塌陷区体积约 168 000 m<sup>3</sup>,3<sup>#</sup>塌陷区体积约 78 000 m<sup>3</sup>,4<sup>#</sup>塌陷区体积约 182 000 m<sup>3</sup>,3<sup>#</sup>矿体和 4<sup>#</sup>矿体-250 m 以下均为采空区位置,按照矿山开采方案,-250 m、-257 m 和-300 m、-357 m 间留设 7 m 顶柱,由于采空区无法探测,根据矿体边界来圈定采空区的范围。模型建立后,通过相关插件导入 FLAC<sup>3D</sup> 软件中进行后续计算任务,计算模拟方案见表 4。

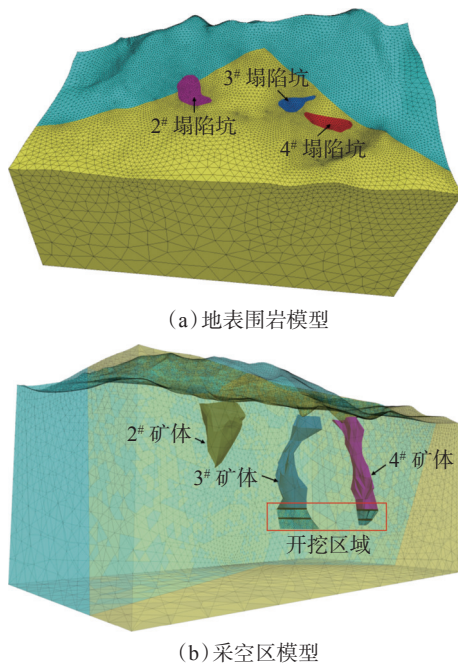


图 2 三维数值模型

Fig. 2 Three-dimensional numerical model

#### 3.2 岩体力学参数与基本力学模型

计算中采用摩尔-库伦本构模型<sup>[13-15]</sup>。根据矿山的工程地质特征,模拟共考虑 4 种力学介质,即上盘灰岩、下盘砂卡岩、矿体和第四系。综合选取的岩体力学参数见表 5。

表 5 岩体力学参数

Table 5 Mechanical parameters of rock mass

岩性	容重/(g/cm <sup>3</sup> )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力 C	内摩擦角/(°)	泊松比
灰岩	2.67	18.90	1.50	12.43	1.80	36	0.22
砂卡岩	2.79	27.08	1.80	13.06	2.10	42	0.25
矿体	3.70	27.60	1.80	15.70	2.10	42	0.25
第四系	1.80	0.30	0.02	0.05	0.02	25	0.30

表 4 模拟方案

Table 4 Simulation scheme

方案编号	计算自重作用下的初始应力场
1	开挖地表,形成 2 <sup>#</sup> 塌陷坑、3 <sup>#</sup> 塌陷坑、4 <sup>#</sup> 塌陷坑
2	留设 7 m 顶柱
3	开挖矿体形成采空区
4	2 <sup>#</sup> 塌陷坑、3 <sup>#</sup> 塌陷坑、4 <sup>#</sup> 塌陷坑覆土

#### 3.3 计算结果分析

开挖结束后,选取与采空区走向平行和垂直的竖直截面进行分析。模拟计算得到的最大应力分布和位移变化结果如图 3 和图 4 所示。3<sup>#</sup>矿体采空区形成后,采空区顶板及四周围岩均出现拉应力集中现象,在采空区顶板、间柱中央位置及上盘围岩所在区域应力集中范围较大,其余地方应力集中程度相对较小,远离采空区区域恢复原岩应力状态。最大主应力为 1.5 MPa 左右,未超过顶板岩层的最大抗拉强度,顶板不会产生拉伸破坏情况。从位移来看,顶板表现为下沉,底板表现为底鼓,最大位移量约 7.1 cm,顶柱整体变形量较小。综合考虑应力及位移变化情况,3<sup>#</sup>矿体两个中段采空区可以保持稳定。

4<sup>#</sup>矿体采空区形成后,最大主应力同样集中在采空区顶板、间柱中央位置。最大主应力为 1.5 MPa 左右,未超过顶板岩层的最大抗拉强度,顶板不会产生拉伸破坏情况。从位移来看,顶板表现为下沉,底板表现为底鼓,最大位移量约为 4.2 cm,顶柱整体变形量较小。综合分析 4<sup>#</sup>矿体两中段采空区可以保持稳定。

#### 4 地表覆土后对井下采空区的影响分析

对地表在对地表塌陷坑进行覆土后,模拟计算结果如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可知,地表塌陷坑覆土后,3<sup>#</sup>矿体采空区最大主应力分布范围无扩大趋势,最大主应力约为 1.5 MPa,最大位移量为 7.2 cm;4<sup>#</sup>矿体采空区最大主应力分布范围无扩大趋势,最大主应力约为 1.5 MPa,顶板最大位移量为 4.2 cm。综上所述,对比塌陷坑未覆土前,采空区受力和位移变形几乎无变化,塌陷坑覆土不会影响采空区整体稳定性。

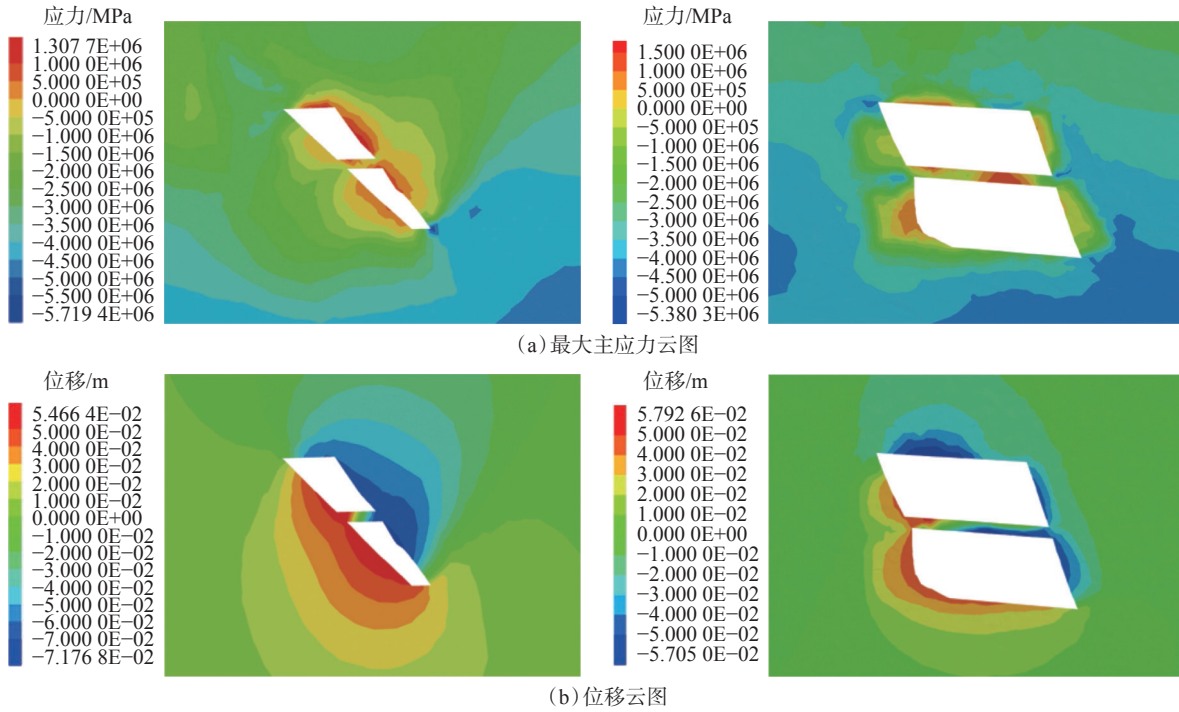


图 3 3<sup>#</sup>矿体采空区稳定性分析云图

Fig. 3 Cloud chart for stability analysis of mined out area of 3<sup>#</sup> ore body

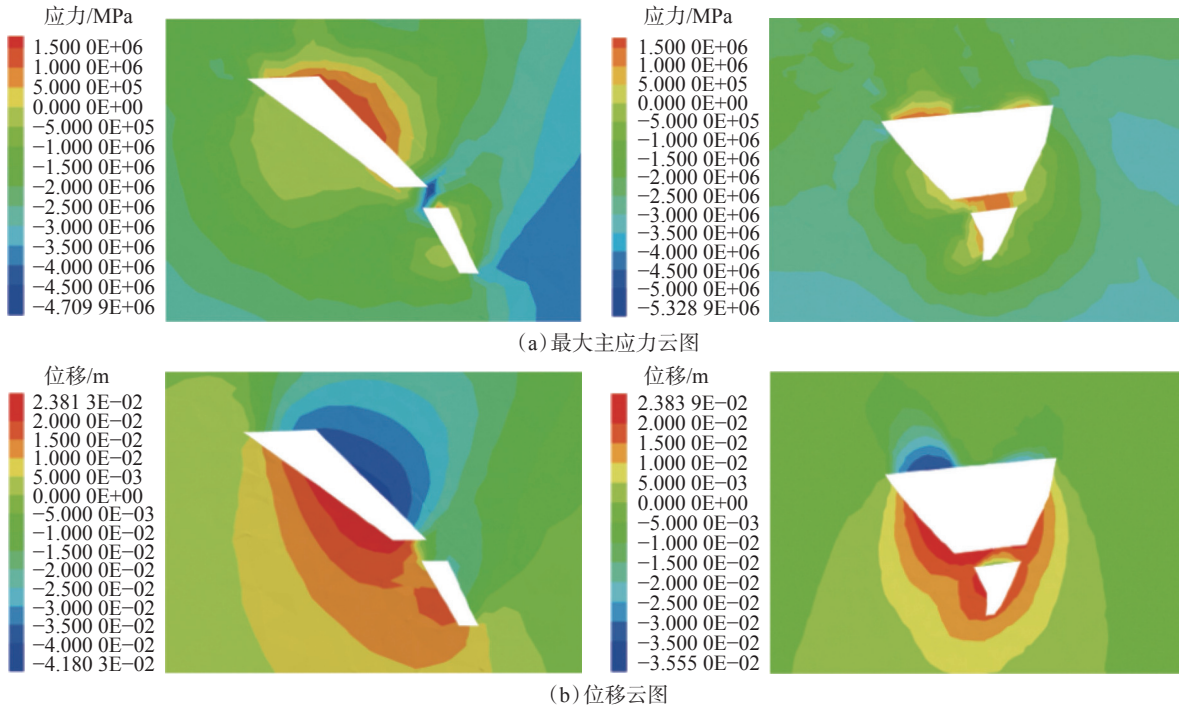


图 4 4<sup>#</sup>矿体采空区稳定性分析云图

Fig. 4 Cloud chart for stability analysis of mined out area of 4<sup>#</sup> ore body

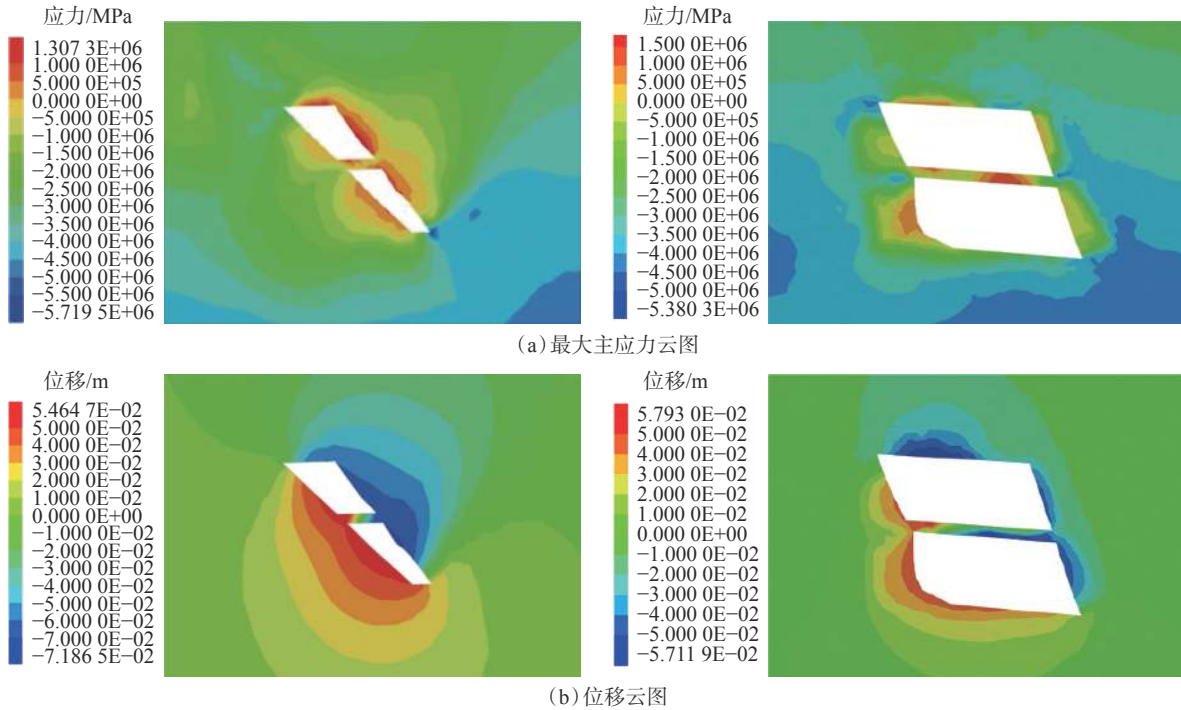
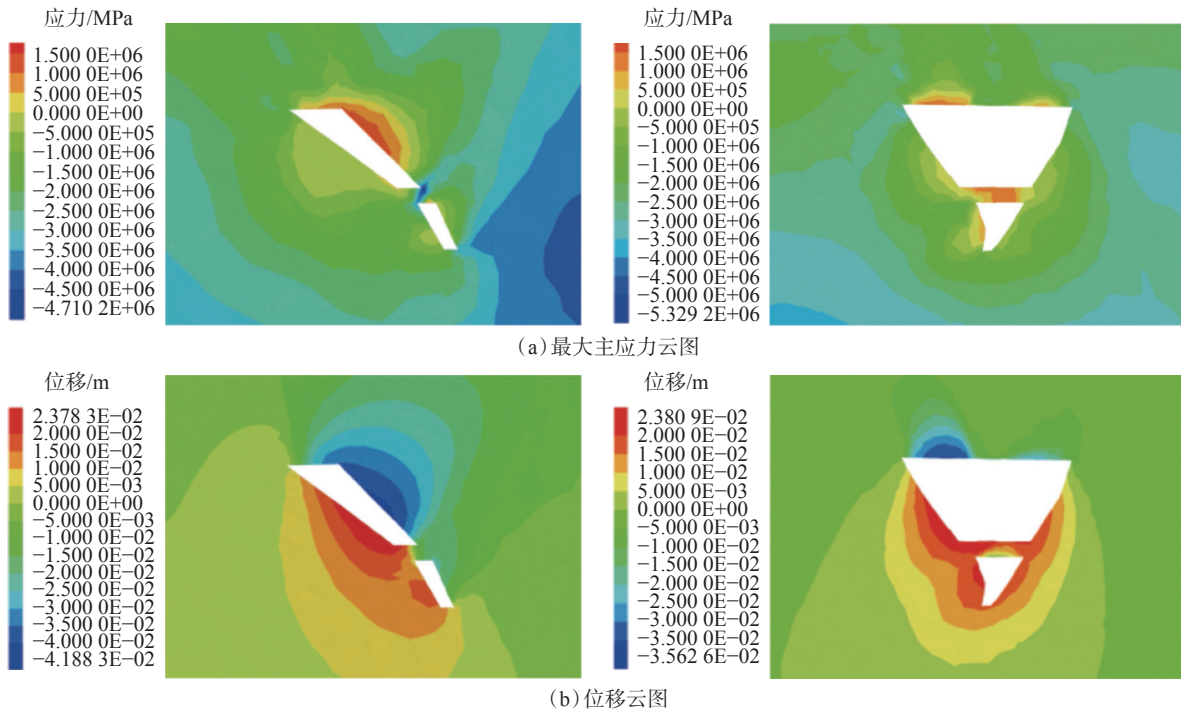
5 结 论

1)-250 m 中段以上采空区形成时间较长, 覆岩厚大且完整性好, 截至目前地表未再次出现开裂及沉陷情况, 综合判断其处于稳定状态。

2)-250 m 以下采空区稳定性数值模拟计算结果表明, 当前采空区形成后, 采空区出现局部区域的应

力集中, 最大拉应力未超过岩层的抗拉强度; 最大竖直位移出现在顶板位置, 整体位移变形较小, 下沉和底鼓现象不明显; 采空区稳定性较好。

3)地表覆土后, 井下采空区受力和位移变形几乎无变化, 塌陷坑覆土不会影响采空区整体稳定性。

图 5 3<sup>号</sup>矿体覆土后采空区稳定性分析云图Fig. 5 Stability analysis cloud map of 3<sup>rd</sup> ore body after covering soil图 6 4<sup>号</sup>矿体覆土后采空区稳定性分析云图Fig. 6 Stability analysis cloud map of 4<sup>th</sup> ore body after covering soil

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 杨勇, 张敏思, 张飞, 等. 红岭多金属矿复杂采空区稳定性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14982-14987.  
YANG Yong, ZHANG Minsi, ZHANG Fei, et al. Stability of complex lead mined-out area of a polymetallic mine in Hongling[J]. Sci-

ence Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14982-14987.

- [ 2 ] 周逸文, 张涛, 段隆臣, 等. 我国矿山采空区综合治理研究综述[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(4): 220-230.  
ZHOU Yiwen, ZHANG Tao, DUAN Longchen, et al. Summary of research on comprehensive treatment of mine goaf in China[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 220-230.

- [ 3 ] 王波,蔡承刚,汤志刚,等.石膏矿采空区地面塌陷特征的离散元模拟[J].矿业研究与开发,2021,41(7):71-78.  
WANG Bo, CAI Chenggang, TANG Zhigang, et al. Discrete element simulation of ground collapse characteristics in goaf of gypsum mine[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(7): 71-78.
- [ 4 ] 秦锡鹏,邓喀中,郑美楠,等.徐州西部关闭矿井地表次生沉陷监测与分析[J].测绘科学,2022,47(8):247-254.  
QIN Xipeng, DENG Kazhong, ZHENG Meinan, et al. Monitoring and analysis of surface secondary subsidence of closed mines in Western Xuzhou[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(8): 247-254.
- [ 5 ] 汪云甲.矿区生态扰动监测研究进展与展望[J].测绘学报,2017,46(10):1705-1716.  
WANG Yunjia. Research progress and prospect on ecological disturbance monitoring in mining area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1705-1716.
- [ 6 ] 赵亮,文兴,覃敏,等.某石膏矿床深部开采稳定性分析[J].矿业研究与开发,2022,42(5):54-59.  
ZHAO Liang, WEN Xing, QIN Min, et al. Stability analysis on deep mining in a gypsum deposit[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(5): 54-59.
- [ 7 ] 谢伟,倪彬,李乾龙,等.基于Mathews图解法的采空区稳定性分析[J].金属矿山,2022(6):40-45.  
XIE Wei, NI Bin, LI Qianlong, et al. Stability analysis of goaf based on Mathews graphic method[J]. Metal Mine, 2022(6): 40-45.
- [ 8 ] 王万红,王远,杜翠凤,等.房柱法开采大面积采空区群的稳定性分析[J].矿业研究与开发,2020,40(8):41-44.  
WANG Wanhong, WANG Yuan, DU Cuifeng, et al. Stability analysis on large-area goaf group in room and pillar mining method[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(8): 41-44.
- [ 9 ] 张瑞,邓红卫.基于多种评价方法的复杂采空区群稳定性评价与分级研究[J].金属矿山,2018(10):18-23.  
ZHANG Rui, DENG Hongwei. Study on stability evaluation and classification of complex goafs group based on multiple evaluation methods[J]. Metal Mine, 2018(10): 18-23.
- [ 10 ] 中华人民共和国交通运输部.采空区公路设计与施工技术细则:JTG/T D31-03—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [ 11 ] 刘焕春,于建新,焦华喆,等.复杂采空区充填开采对地面建筑的影响研究[J].金属矿山,2020(4):39-45.  
LIU Huanchun, YU Jianxin, JIAO Huajie, et al. Influence of backfill mining in complex goaf on ground buildings[J]. Metal Mine, 2020(4): 39-45.
- [ 12 ] 邹昊,邓喀中.基于PSInSAR技术的老采空区地表沉降监测研究[J].煤炭技术,2017,36(5):175-177.  
ZOU Hao, DENG Kazhong. Monitoring of old goaf surface subsidence based on PSInSAR technique[J]. Coal Technology, 2017, 36(5): 175-177.
- [ 13 ] 张驰,冀虎,陈凯,等.二步采场回采下的一步采空区稳定性数值模拟分析[J].中国矿业,2021,30(3):181-187.  
ZHANG Chi, JI Hu, CHEN Kai, et al. Stability analysis of one-step goaf under the two-step stope recovery[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(3): 181-187.
- [ 14 ] 黄敏,崔年生,危剑林,等.地下采空区对地表建(构)筑物的影响分析[J].中国矿业,2019,28(10):102-108.  
HUANG Min, CUI Niansheng, WEI Jianlin, et al. Analysis of the effect of underground goaf on surface structures[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(10): 102-108.
- [ 15 ] 李文博,彭超,张洪岩,等.地面竖直荷载作用下采空区临界扰动深度及其稳定性研究[J].中国矿业,2021,30(3):149-154.  
LI Wenbo, PENG Chao, ZHANG Hongyan, et al. Research on critical disturbance depth and stability of goaf under vertical ground load[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(3): 149-154.